

УДК 539.383

**М. П. Пузанов**

ВИЗ-Сталь, г. Екатеринбург

*puzanov\_mp@nlmk.com*

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук Ю. Н. Логинов

## ВАРИАНТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СЖАТИИ ЦИЛИНДРА ИЗ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрен процесс сжатия цилиндра из анизотропного материала. Для анализа пластического течения применена теория Хилла. Получено решение краевой задачи для одного из вариантов соотношений коэффициентов Хилла. Показано, что основания цилиндрической заготовки в этом случае превращаются из окружностей в овалы. Приведено векторное решение задачи с совокупностью стрелок, характеризующих направление главных деформаций.

*Ключевые слова:* сжатие цилиндра, анизотропия механических свойств, электротехническая сталь, тензор деформаций, условие текучести Хилла

**M. P. Puzanov**

## OPTION FOR CHANGE IN COMPRESSION OF A CYLINDER FROM ANISOTROPIC MATERIAL

The compression process of a cylinder made of anisotropic material is considered. For the analysis of plastic flow, Hill's theory was applied. The solution of the boundary value problem is obtained for one of the variants of the relations of Hill coefficients. It is shown that the bases of a cylindrical billet in this case turn from circles to ovals. A vector solution of the problem with a set of arrows characterizing the direction of the main deformations is given.

*Key words:* cylinder compression, anisotropy of mechanical properties, electrical steel, strain tensor, Hill yield condition

**П**роцесс кузнечной осадки в книгах по теории пластичности рассматривается как один из самых простых для теоретического описания. Однако при ближайшем рассмотрении и приближении

к более реальным реономным свойствам деформируемых материалов этот процесс выглядит гораздо более сложным. Свои математические решения существуют для кузнечной осадки среды со свойством пластической сжимаемости [1], для несжимаемых сред, но имеющих свойство разупрочнения [2] и для сред с еще более сложными свойствами.

Одно из свойств, которое часто для упрощения подхода не принимается во внимание — это свойство анизотропии. В большинстве случаев среда описывается как изотропная, что сказывается на формулировке условия текучести, а также на формулировке уравнений связи напряжений и деформаций. Формирование анизотропии свойств является часто негативным моментом в технологиях [3], но иногда это позволяет усиливать какое-либо свойство, например, магнитное [4] в нужном направлении. Анизотропию магнитных свойств в магнитомягких материалах используют в устройствах, преобразующих электрическую энергию, добиваясь повышения магнитной проницаемости и снижения коэрцитивной силы в заданном направлении.

Вариантом описания анизотропии пластических свойств металла является условие текучести Хилла. Его использовали в данной работе для решения краевой задачи осадки цилиндрической заготовки [5–6]. Решение осуществляли, применяя метод конечных элементов, реализованный в программном модуле Deform-3D. В условие текучести Хилла входит ряд коэффициентов, характеризующих различие свойств материала в различных направлениях:  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$ , их часто называют коэффициентами анизотропии. На рис. 1 отображена общая постановка задачи. Верхний и нижний бойки осуществляют сжатие четверти цилиндра. Осадка производилась перемещением верхнего бойка, величина обжатия составляла 40 %. На боковых гранях заготовки были применены граничные условия симметрии, трение на контактных поверхностях задавалось по закону Кулона. Величина коэффициента трения принята минимально возможной  $\mu = 0,0001$ .

В решении задачи назначали различное соотношение коэффициентов анизотропии и получали различное формоизменение цилиндрической заготовки. Для оценки деформированного состояния применяли и векторное отображение главных деформаций, что иллюстрируется рис. 2, где показан вариант решения задачи для соотношения коэффициентов  $F = 7 G$ ;  $G = H$ .

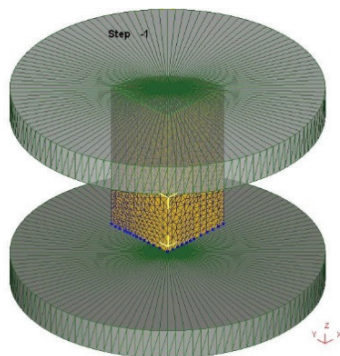


Рис. 1. Модель процесса осадки

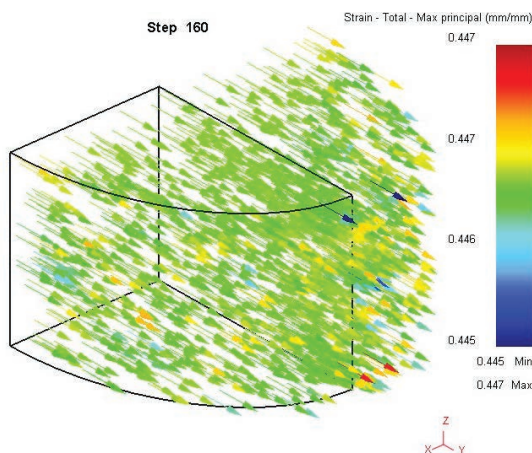


Рис. 2. Векторное отображение (стрелки) главных максимальных деформаций на четверти объема цилиндра

Деформация сжатия была направлена вдоль оси  $Z$ . Соответственно, материал мог деформироваться за счет растяжения по осям  $X$  и  $Y$ . Анализ рисунка показывает, что главные максимальные деформации в рассматриваемом случае практически одинаковы и направлены в сторону координаты  $Y$ . Деформации растяжения относительно оси  $X$  оказываются меньше. Это приводит к тому, что основания цилиндра превращаются в овалы с длинной осью, направленной вдоль оси  $Y$ , а короткой — вдоль оси  $X$ .

Полученное решение соответствует представлениям о предпочтительном пластическом течении материала в том направлении, в котором сопротивление деформации оказывается меньше.

### Литература

1. Дегтярев И. С., Колмогоров В. Л., Логинов Ю. Н. Осадка пористой полосы в условиях предельного трения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1975. № 6. С. 126–129.
2. Логинов Ю. Н., Ершов А. А. Влияние вида кривой упрочнения на локализацию деформации при осадке титановых заготовок // Титан. 2012. № 1 (35). С. 22–28.
3. Логинов Ю. Н., Зуев А. Ю. Формоизменение и сопротивление деформации анизотропной непрерывно-литой меди // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 1. С. 32–37.
4. Логинов Ю. Н., Ермаков А. Е., Шангуров А. В. Исследование формирования анизотропии магнитных свойств при осадке заготовок из сплавов системы Mn–Al–C // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. № 8. С. 4–5.
5. Логинов Ю. Н., Пузанов М. П. Моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки при использовании условия текучести Хилла // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 9. С. 11–16.
6. Loginov Y. N., Puzanov M. P. Finite element modeling of the upsetting of an anisotropic cylindrical workpiece // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1915. P. 040033-1-040033-5.